CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1. Introducción.

Este Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo la optimización de la resistencia de un sistema mecánico formado por un eje y un cubo unidos mediante un ajuste a presión, así como el estudio de la variación de dicha resistencia con la variación de ciertos parámetros del modelo.

En gran cantidad de aplicaciones en las que se genera energía mecánica ésta se transmite mediante rotación. Los ejes son unos de los elementos más importantes en dichas transmisiones ya que además de transferir toda la energía generada, también sirven de soporte para otros elementos que se encuentran unidos a él. Estos elementos, como puede ser un engranaje o un rotor con álabes, son generalmente llamado cubos. La unión entre el eje y el cubo puede ser de diversas formas. Entre las más usadas está el uso de chavetas o el de ajustes a presión. Este último es el que se va a estudiar en el presente proyecto.

En los acoplamientos eje-cubo con ajuste a presión aparece el fenómeno denominado fatiga por fretting. La fatiga es el fenómeno por el cual un elemento sometido a un estado de tensiones fluctuantes puede desarrollar grietas o llegar a la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones. El fretting es a su vez un tipo de fatiga que se produce en las superficies de contacto de dos elementos unidos bajo presión cuando éstas están sometidas a desplazamientos relativos micrométricos. Los componentes sometidos a fretting-fatiga se encuentran bajo un campo de tensiones provocado tanto por la presión de la unión y la geometría de los mismos como por las cargas cíclicas tangenciales transmitidas entre las superficies. La suma de estos efectos genera la nucleación de numerosas grietas en la zona de contacto, que pueden crecer de diversas formas. De esta manera se produce el deterioro de las superficies por el desprendimiento de lascas de material cuando varias grietas se unen a cierta profundidad. También puede producirse el crecimiento de las grietas hasta la fractura final del componente. Para este tipo de fatiga existen multitud de paliativos que reducen o incluso eliminan la fatiga por fretting en aplicaciones como el ajuste a presión entre eje y cubo. A pesar de ello no existen unas directrices claras, e incluso existen en la literatura algunos resultados contradictorios, de ahí la importancia del estudio que se va a llevar a cabo.

El sistema resuelto en el proyecto es el de un eje biapoyado, pero los resultados serán generalmente extrapolables a otro tipo de condiciones de contorno. Respecto al estado de cargas al que se va a someter al sistema es el correspondiente a la transmisión de movimiento por medio de un engranaje, es decir, se le aplica una fuerza perpendicular al eje y el par

correspondiente a la misma. El problema que se tiene en este tipo de acoplamientos es el problema de flexión rotativa, en el que los ciclos de carga sobre el sistema se deben al giro del mismo respecto a la carga aplicada. Debido a la dificultad de la resolución de un problema de flexión rotativa se realiza una aproximación resolviendo el problema como de flexión alterna. En el problema de flexión alterna el sistema se encuentra estático, simulándose el proceso de giro del mismo mediante la aplicación cíclica de la carga. De esta manera se puede estudiar el problema sin proceder a un estudio dinámico del mismo.

El modelo realizado es paramétrico de manera que se pueden estudiar varias opciones. El modelo de ajuste eje-cubo a presión que se estudia es el que se muestra en la siguiente figura. Se trata de un eje con dos tramos de diferente sección con un tramo de transición entre ambos que se realiza mediante cierto radio de acuerdo.

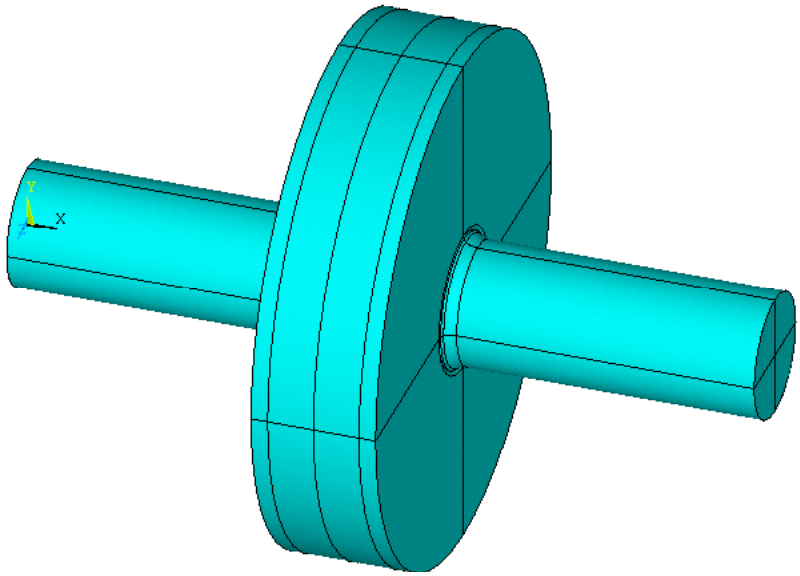

Figura 1.1. Acoplamiento eje-cubo con ajuste a presión

En el tramo de mayor diámetro es donde se acopla el cubo mediante el ajuste a presión. El cambio de sección que presenta el eje es uno de los paliativos que se utilizan. Además el valor de la interferencia en el ajuste a presión, será determinante en el cálculo de la vida a fatiga, por lo que también habrá de tenerse en cuenta. Deberá ser como mínimo de un valor tal que sea capaz de transmitir el par entre el eje y el cubo sin deslizamiento global. Debido al proceso de fabricación el valor de la interferencia en el sistema real estará en un intervalo. Aquí se buscará la mejor interferencia en una situación ideal, y a partir de ahí ya se podrá elegir el tipo de ajuste y tolerancias.

Junto a los parámetros anteriores hay otros dos que se estudiarán. Uno ya se ha comentado y es el radio de acuerdo entre las dos secciones del eje. Éste también influye en la vida a fatiga ya que modifica la distribución de tensiones, en concreto de tensión axial en la zona del ajuste, de forma que al disminuir el radio la zona de tensiones más elevadas se aleja de la zona del contacto. Y por último el radio de acuerdo que se ha colocado en la esquina del cubo donde éste entra en contacto con el eje, que también influirá en la vida a fatiga. Estos parámetros comentados son los que se estudiarán como paliativos para la fatiga por fretting en este tipo de sistemas mecánicos. Para el estudio de estos parámetros se va a realizar una optimización del sistema. Ésta consistirá en buscar la máxima vida variando los parámetros anteriores dentro de unos intervalos preestablecidos. La optimización es realizable gracias al carácter paramétrico del modelo que permite ir cambiando cualquier dimensión o característica del mismo de forma automática.

Para la realización de esta optimización se han implementado dos algoritmos de optimización no lineal con restricciones. Esta implementación se ha realizado a pesar de que el programa de elementos finitos utilizados cuenta con un módulo de optimización ya que debido a incongruencias y a indefiniciones en el manual de usuario de dicho módulo se carece de control sobre el proceso de optimización.

El primer algoritmo que se implementa es de primer orden, basado en el método del gradiente y el segundo utiliza el algoritmo de segundo orden de métrica variable de Davidon-Fletcher-Powell. Los algoritmos implementados transforman el problema de minimización con restricciones en uno sin restricciones mediante la creación de una función objetivo en la que se penaliza la violación de dichas restricciones. El método de penalización utilizado es el método de la penalización interior extendida. Ambos se diferencian en la forma en que obtienen la dirección de búsqueda. Una vez obtenida ésta ambos algoritmos utilizan el método de la sección áurea para la búsqueda monodimensional en dicha dirección. Este método reduce considerablemente el número de evaluaciones para encontrar el mínimo en una dirección de búsqueda dada.

1.2. Objetivos.

Como se ha explicado, la idea del proyecto es la obtención de la influencia de los parámetros que se han comentado en la vida a fatiga del acoplamiento eje-cubo con ajuste a presión. Estos parámetros son la interferencia, la relación de diámetros del eje entre el nominal y el de la zona del ajuste, el radio de acuerdo entre ambos diámetros y el radio de acuerdo del cubo en el borde del contacto con el eje. El estudio se centrará fundamentalmente en el estudio

del proceso de optimización de la geometría comentada en el que se considera como variable fundamental a maximizar la resistencia a fatiga de los componentes.

Los principales objetivos a satisfacer en este proyecto son los siguientes:

- Implementación de dos algoritmos de optimización que permitan la resolución de problemas no lineales con restricciones.

- Comprobación de la validez de los algoritmos de optimización implementados. Para ello se comparan los resultados obtenidos para varios problemas en un programa de elementos finitos y en el lenguaje de programación *FORTRAN*, en el que se optimiza mediante la solución analítica.

- Generación en un programa de elementos finitos de una geometría paramétrica del acoplamiento eje-cubo, mallado, aplicación de cargas y condiciones de contorno y resolución del modelo.

- Determinar la resistencia a fatiga por fretting en el eje.

- Generación de una función que permita la optimización del modelo realizado en elementos finitos mediante la definición de una serie de variables de diseño a optimizar de acuerdo con una determinada función objetivo y sujeto a una serie de restricciones.

- Optimización e interpretación de los resultados, comprobando el rango de validez de los mismos.

Dada la dificultad del proyecto es preciso plantear la metodología que se va a seguir para la realización del mismo de una manera adecuada. Los paso que se llevarán a cabo son los siguientes:

1.- Selección de los algoritmos de optimización e implementación de los mismos en *APDL* (lenguaje de *ANSYS*®) y en *FORTRAN*.

2.- Realización y comprobación de la validez de los resultados obtenidos con los algoritmos implementados mediante la resolución de problemas con solución analítica conocida.

3.- Generación de la geometría del modelo del acoplamiento eje-cubo en un programa de elementos finitos, obtención del rango de validez de los parámetros que generan el modelo, mallado coherente del modelo en dicho rango, aplicación de cargas y condiciones de contorno y resolución de manera automática mediante un archivo de entrada al programa de elementos finitos.

4.- Postprocesado de la solución calculando el punto más desfavorable respecto a la fatiga por fretting, así como el valor de la vida en dicho punto.

5.- Realización de un análisis de convergencia de la malla para elegir la más adecuada para el proceso de optimización.

6.- Resolución del modelo elegido en el proceso de optimización para determinar los valores de los parámetros de optimización.

7.- Realización de un análisis de sensibilidad del óptimo obtenido en el proceso anterior para poder observar la validez de los resultados obtenidos y la importancia de cada parámetro en las especificaciones del componente.

Un último paso a tener en el proceso completo de verificación de la solución obtenida sería la comparación experimental de los resultados numéricos. Esto excede de los límites del proyecto, pero será comentado brevemente debido a su importancia. Después de la resolución numérica del problema de la unión mediante ajuste a presión será necesaria la validación del diseño resuelto mediante la comprobación experimental de los resultados numéricos. Estos ensayos se efectuarán en un reducido número de uniones con ajuste a presión (de las mismas características y dimensiones del diseño escogido). De esta manera, el análisis numérico a realizar permitirá reducir en gran medida el número de ensayos necesarios para poder garantizar la resistencia de la unión. Al no ser viable la comprobación de la validez de cada diseño utilizado en el proceso de optimización sí sería conveniente que se compruebe experimentalmente el diseño óptimo.